

Optimasi Proses Pemesinan *Milling* Fitur *Pocket* Material Baja Karbon Rendah Menggunakan *Response Surface Methodology*

The Jaya Suteja, Susila Candra, Yudistira Aquarista
Teknik Manufaktur, Universitas Surabaya
E-mail: jayasuteja@yahoo.com

ABSTRAK

Proses pemesinan *milling* merupakan salah satu proses pemesinan yang banyak digunakan untuk pembuatan suatu komponen. Dalam proses pemesinan *milling* waktu yang dibutuhkan untuk membuat komponen harus seminimal mungkin agar tercapai kapasitas produksi yang tinggi. Parameter proses pemotongan yang maksimum akan menghasilkan laju pemakanan material (*MRR*) yang tinggi namun juga mengakibatkan kekasaran permukaan (*Ra*) yang tinggi pula. Oleh karena itu, parameter proses pemesinan *milling* yang optimum perlu untuk diketahui. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan model matematis yang dapat menggambarkan hubungan antara kedalaman pemotongan dan pergeseran pahat dengan kekasaran permukaan dan waktu pemakanan material untuk dua macam *cut type*. Setelah itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mencari kombinasi kedalaman potong dan pergeseran pahat untuk mendapatkan kondisi optimum yaitu *MRR* yang paling tinggi dan *Ra* yang paling rendah. Proses pemesinan *milling* pada penelitian ini dilakukan pada sebuah fitur *pocket* material baja karbon rendah dengan dimensi $P \times L \times T$ adalah $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$. Dalam penelitian ini metode optimasi yang digunakan adalah *Response Surface Methodology*. Dari hasil optimasi diperoleh bahwa pergeseran pahat dan kedalaman potong yang memberikan respon *MRR* dan *Ra* yang optimal berturut-turut adalah $6,7582 \text{ mm}$ dan $0,22 \text{ mm}$. Dengan menggunakan parameter proses tersebut, nilai *MRR* dan *Ra* yang didapatkan untuk *zig-zag cut type* adalah $9,619 \text{ mm}^3/\text{detik}$ dan $1,5124 \mu\text{m}$ sedang untuk *spiral cut type* adalah $8,981 \text{ mm}^3/\text{detik}$ dan $1,3824 \mu\text{m}$.

Kata kunci: Optimasi, *milling*, baja karbon rendah, *response surface methodology*.

ABSTRACT

Milling process is one of machining process mostly used to manufacture a component. In machining a component, to achieve higher production capacity, machining time should be minimized by increasing material rate removal. However, higher material rate removal will cause higher surface roughness. For that reason, machining parameter of milling process must be optimized. This research aims to develop mathematical model which can describe the relation between step over and depth of cut with surface roughness and machining time for two cut types. Subsequently, the purpose of this research is to find the combination of step over and depth of cut which resulting the maximum material rate removal and the minimum surface roughness. Milling process in this research is performed to machine a pocket feature of low carbon steel with dimension of $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$. To find the optimum milling parameter, the response surface methodology is used. Based on the optimization results, recommended step over and depth of cut is 6.7582 mm and 0.22 mm . By implementing this parameter, the achieved material rate removal and surface roughness for zig-zag cut type is $9.619 \text{ mm}^3/\text{s}$ and $1.5124 \mu\text{m}$. Meanwhile, for spiral cut type the achieved material rate removal and surface roughness is $8.981 \text{ mm}^3/\text{s}$ dan $1.3824 \mu\text{m}$.

Keywords: Optimization, milling, low carbon steel, response surface methodology.

PENDAHULUAN

Proses pemesinan *milling* merupakan salah satu proses pemesinan yang banyak digunakan untuk pembuatan komponen. Proses pemesinan *milling* sering digunakan untuk membuat komponen yang mempunyai fitur berupa suatu *profil* dan juga *trajec-*

tory yang kompleks. Sebagai contoh, proses pemesinan *milling* sering digunakan dalam pembuatan cetakan (*mould*) untuk membuat produk-produk dari plastik.

Dalam melakukan proses pemesinan *milling*, waktu yang dibutuhkan untuk membuat komponen harus sesingkat mungkin agar dapat mencapai

kapasitas produksi yang tinggi. Untuk mencapai waktu minimal, parameter proses pemesinan yang ada pada mesin *milling* harus diatur pada kondisi maksimum sehingga akan menghasilkan laju pemakanan material yang tinggi. Akan tetapi, parameter proses pemesinan yang diatur maksimum akan menyebabkan kekasaran permukaan suatu produk komponen menjadi lebih tinggi.

Dewasa ini, beberapa segmen konsumen tertentu membutuhkan komponen yang mempunyai kehalusan permukaan tertentu dan menuntut agar komponen tersebut diproses dalam waktu yang cepat. Sebagai contoh untuk membuat cetakan plastik, kekasaran permukaan dari cetakan harus sekecil mungkin tapi dituntut untuk selesai dalam waktu yang cepat. Untuk itu optimasi parameter proses pemesinan pada mesin *milling* perlu dilakukan agar kekasaran permukaan yang diinginkan dapat dicapai dalam waktu yang paling singkat.

Dari penelitian sebelumnya banyaknya parameter dan hubungan antar parameter terkait proses *milling* yang telah diteliti. A.M. Ramos, *et.al.* melakukan studi dan analisa kekasaran permukaan yang dihasilkan dengan tiga macam strategi pemesinan *milling* yang berbeda yaitu tipe *radial*, *raster* dan *3D offset* untuk komponen yang mengandung geometri kompleks seperti bentuk cembung dan cekung [1]. Dari penelitian yang dilakukan, Ramos menyimpulkan bahwa ketiga strategi pemesinan menghasilkan kekasaran permukaan yang berbeda dan tipe *3D offset* adalah yang paling cocok untuk pemesinan komponen yang mengandung geometri kompleks.

Wang M.Y., *et.al.* menganalisa pengaruh kecepatan potong, kecepatan makan, kedalaman potong dan geometri pahat terhadap kekasaran permukaan ketika melakukan *slot end milling* pada AL2014-T6 [2]. Selain itu Wang M.Y., *et.al.* juga menyelidiki pengaruh pemberian cairan pendingin pada kekasaran permukaan. Hasil penelitian yang dilakukan menunjukkan bahwa untuk kondisi tanpa cairan pendingin, kekasaran permukaan sangat dipengaruhi oleh kecepatan potong, kecepatan makan, dan geometri pahat. Sedangkan untuk kondisi dengan cairan pendingin, faktor yang sangat berpengaruh terhadap kekasaran permukaan adalah kecepatan makan dan geometri pahat. Lebih jauh lagi, proses dengan menggunakan cairan pendingin menghasilkan kekasaran permukaan yang lebih halus dibandingkan tanpa cairan pendingin.

Sedangkan, Bernardos P.G., *et.al.*, mencoba memprediksi hubungan antara kedalaman pemotongan, kecepatan makan per gigi, kecepatan potong, pahat, cairan pendingin dan gaya potong dengan kekasaran permukaan pada pemesinan *milling* paduan aluminium [3]. Berdasarkan *Taguchi Design of Experiments* dan *Artificial Neural Networks* didapatkan bahwa faktor yang sangat berpengaruh

adalah kecepatan makan, gaya potong, kedalaman potong dan penggunaan cairan pendingin.

Sementara itu, Chang C.K., *et.al.* mencoba mencari hubungan antara kecepatan potong, kecepatan makan tiap gigi, kedalaman potong radial dan aksial, panjang pahat, dan keausan pahat terhadap kekasaran permukaan dari hasil proses pemesinan *side milling* material S45C [4]. Dengan menggunakan *Different Polynomial Networks*, Chang C.K. *et.al.* menyimpulkan bahwa parameter yang paling mempengaruhi kekasaran permukaan adalah kecepatan potong, kecepatan makan tiap gigi dan keausan pahat.

Ryu S.H., *et.al.* melakukan percobaan untuk mencari kaitan antara geometri pahat, kecepatan pemakanan, keausan pahat, kesalahan *setting* dan defleksi pahat dengan tekstur dari permukaan hasil proses *end milling* [5]. Dari hasil penelitian diperoleh kesimpulan bahwa tekstur dari permukaan dipengaruhi oleh kombinasi geometri pahat dan kondisi pemotongan. Keausan pahat dan kesalahan *setting* akan mempengaruhi profil permukaan yang terjadi, sedangkan defleksi pahat akan mempengaruhi kesalahan pada permukaan.

Sedangkan, Göloğlu C., *et.al.* menggunakan *Genetic Programming* untuk memprediksi pengaruh dari beberapa parameter pemesinan seperti kecepatan potong, kecepatan pemakanan, kedalaman pemotongan dengan menggunakan strategi pemesinan tipe *zigzag* terhadap kekasaran permukaan [6]. Göloğlu C., *et.al.* menyatakan bahwa selain parameter pemesinan di atas, pergeseran pahat juga mempengaruhi kekasaran permukaan dari pemesinan *milling*.

Selain penelitian untuk mencari pengaruh dari berbagai parameter, beberapa penelitian juga mencoba mengoptimasi berbagai parameter untuk mencari kekasaran permukaan yang optimal. Oktem H., *et.al.* mencoba mengotimasi beberapa parameter pemotongan seperti kecepatan makan, kecepatan potong, kedalaman pemotongan, dan toleransi pemesinan sehingga mendapatkan kekasaran permukaan yang paling kecil pada Aluminium 7075-T6 [7]. Dari hasil optimasi menggunakan *Taguchi Optimization Method* berbasis *full factorial design*, kekasaran permukaan berkurang sebesar 5,1% dibandingkan sebelum dioptimasi.

Reddy N.S.K., *et.al.* melakukan penelitian untuk mengetahui pengaruh geometri pahat (*radial rake angle* dan *nose radius*) dan kondisi pemotongan (kecepatan potong dan kecepatan makan) terhadap kekasaran permukaan pada proses *end milling* dari baja karbon medium dan kemudian mengolah data tersebut untuk mendapatkan kekasaran permukaan paling rendah dan laju pemakanan material paling besar menggunakan *Response Surface Methodology* dan *Genetic Algorithms* [8]. Untuk mendapatkan kekasaran permukaan yang paling kecil, kecepatan

potong yang digunakan adalah 245,97 m/menit, kecepatan makan 202,17 mm/menit, *rake angle* sebesar $4,40^\circ$, *nose radius* sebesar 0,43 mm dan laju pemakanan material sebesar 67,58 mm³/detik.

Zhang J.Z., *et.al.* menggunakan *Taguchi Design Methods* untuk mengoptimalkan kualitas permukaan hasil CNC *face milling* [9]. Pada penelitian yang dilakukan oleh Zhang J.Z., *et.al.*, kecepatan pemakanan, kecepatan putar dan kedalaman potong digunakan sebagai faktor pengontrol. Sedangkan faktor pengganggu yang digunakan adalah temperatur operasi dan kondisi pahat akibat aus. Berikutnya, kekasaran permukaan paling minimum dapat dicapai pada kecepatan putar 3500 rpm, kecepatan makan 762 mm/min dan kedalaman makan 1,52 mm.

Dari studi literatur di atas, pada proses pemmesinan *milling* terdapat beberapa parameter yang berpengaruh pada kekasaran permukaan komponen diantaranya kecepatan potong, kecepatan putaran, kedalaman pemotongan, kecepatan makan, strategi pemmesinan, pergeseran pahat, jenis material bahan baku, jenis pahat, material pahat, dimensi pahat, geometri pahat, penggunaan cairan pendingin dan faktor-faktor lain pada proses pemmesinan seperti adanya getaran, defleksi pahat, temperatur operasi dan keausan pahat.

Dengan meningkatnya kecepatan potong atau kecepatan putaran yang melampaui daerah pembentukan *built-up edge*, kualitas dari permukaan akan meningkat. Akan tetapi, jika meningkatnya kecepatan potong belum melampaui daerah pembentukan *built-up edge*, kualitas dari permukaan akan menurun. Sedangkan, peningkatan kedalaman pemotongan dan kecepatan makan akan meningkatkan kekasaran permukaan. Untuk proses pemmesinan material tertentu, besarnya kecepatan potong, kecepatan putaran dan kecepatan makan yang optimal sangat tergantung pada jenis, geometri, dimensi dan material pahat yang digunakan.

Supplier pahat pada umumnya telah menyediakan data tentang kecepatan potong, kecepatan putaran dan kecepatan makan dari berbagai jenis, geometri, dimensi dan material pahat yang dibuatnya. Namun *supplier* pahat biasanya tidak menyediakan data kedalaman potong yang spesifik. Dengan menggunakan data yang telah disediakan *supplier* pahat, pahat yang digunakan akan lebih lama umurnya dan proses pemmesinan akan lebih produktif. Umur pahat sendiri sangat penting karena pahat merupakan salah satu komponen biaya yang cukup signifikan seperti dijelaskan oleh Choudhury S.K., *et.al.* [10].

Terkait dengan penggunaan cairan pendingin, proses pemmesinan *milling* ternyata menghasilkan kekasaran permukaan yang lebih kecil jika menggunakan cairan pendingin. Kekasaran permukaan yang lebih kecil ini disebabkan penggunaan cairan

pendingin akan menurunkan gesekan permukaan pada *interface* pahat dan benda kerja. Oleh karena itu, untuk menghasilkan kekasaran permukaan yang lebih kecil, proses pemmesinan lebih baik menggunakan cairan pendingin.

Sementara itu pada penelitian-penelitian yang telah dilakukan, pergeseran pahat sering diabaikan dalam memprediksi kekasaran permukaan hasil proses pemmesinan *milling* padahal pergeseran pahat berpengaruh terhadap kekasaran permukaan hasil proses pemmesinan *milling*.

A.M. Ramos, *et.al.* menyatakan bahwa pada pembuatan cetakan plastik, proses gerinda halus, *honing*, *polishing*, atau *lapping* masih harus dilakukan setelah proses *milling* karena penentuan strategi pemmesinan yang tidak tepat [1]. Proses tambahan ini tentunya akan menambah panjang waktu proses dan juga meningkatkan biaya proses pembuatan. Oleh karena itu, studi dan analisa dari macam-macam strategi pemmesinan *milling* perlu untuk dilakukan.

Berdasarkan hasil studi literatur yang sudah dilakukan dan berdasarkan hasil diskusi, penelitian ini mencoba untuk menyelidiki beberapa parameter proses penting yang mempengaruhi kekasaran permukaan namun belum banyak diteliti. Parameter proses yang divariasikan pada penelitian ini adalah pergeseran pahat, dan strategi pemmesinan (*cut type*). Selain itu, kedalaman pemotongan juga digunakan sebagai salah satu parameter yang diselidiki pengaruhnya terhadap kekasaran permukaan karena kedalaman potong tidak secara spesifik ditentukan oleh *supplier* pahat.

Dengan melakukan penelitian ini, tujuan pertama yang hendak dicapai adalah untuk mendapatkan model matematis yang dapat menggambarkan hubungan antara kedalaman pemotongan dan pergeseran pahat untuk masing-masing *cut type* dengan kekasaran permukaan dan waktu pemakanan material. Setelah itu, tujuan berikutnya adalah mencari kombinasi pengaturan kedalaman pemotongan dan pergeseran pahat untuk masing-masing *cut type* yang memberikan kekasaran permukaan dan waktu pemakanan material yang optimal. Kondisi yang optimal yang dimaksud disini adalah waktu pemakanan yang secepat mungkin tapi mendapatkan kekasaran permukaan komponen yang sekecil mungkin.

Untuk proses optimasi, ada beberapa metode yang bisa digunakan tapi yang sering digunakan seperti *Taguchi Optimization Method* dan *Response Surface Methodology*. Dalam implementasinya, kedua metode tersebut sering dibantu oleh *Genetic Algorithm* atau algoritma lainnya untuk mendapatkan proses yang lebih efisien. Kedua metode ini mempunyai kelebihan dan kekurangannya masing-masing. Untuk dapat mendapatkan nilai kedalaman pemotongan dan pergeseran pahat untuk masing-

masing *cut type* yang menghasilkan kekasaran permukaan dan waktu pemakanan material yang optimal, metode yang dapat digunakan adalah *Response Surface Methodology*

METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini, parameter yang digunakan sebagai faktor adalah kedalaman pemotongan, *cut type*, dan pergeseran pahat. Dari hasil studi pendahuluan didapatkan data bahwa *cut type* yang memberikan hasil waktu pemesinan paling cepat adalah jenis *zig-zag* dan *spiral*. Karena merupakan bentuk kualitatif, parameter *cut type* pada rancangan percobaan hanya memiliki dua level faktor (-1 dan 1) dengan *coded variabel* -1 untuk tipe *zig-zag* dan 1 untuk tipe *spiral*.

Untuk mendapatkan model matematik yang menggambarkan hubungan antara kedalaman pemotongan dan pergeseran pahat dengan kekasaran permukaan dan waktu untuk dua macam *cut type* digunakanlah metode faktorial. Sedangkan untuk mencari kombinasi pengaturan kedalaman pemotongan dan pergeseran pahat yang memberikan kekasaran permukaan dan waktu yang optimal untuk dua macam *cut type* digunakan metode *response surface*.

Untuk parameter proses kedalaman pemotongan dan pergeseran pahat mula-mula diambil 3 level (dengan *coded variabel* -1, 0, 1) sebagai percobaan *first order*. Namun jika setelah dianalisis dengan *analysis of variant* ternyata persamaan model tidak linear maka percobaan dilanjutkan dengan percobaan *second order* menggunakan 3 level ditambah 2 level pada titik aksial (1,4142 dan -1,4142). Level untuk pergeseran pahat dan kedalaman pemotongan terlihat pada Tabel 1. Nilai level ditentukan setelah melakukan studi literatur dari berbagai penelitian lain dan katalog yang dilanjutkan dengan melakukan studi pendahuluan.

Unit eksperimen yang digunakan adalah material yang umum digunakan sebagai bahan cetakan plastik yaitu baja karbon rendah. Hal ini dikarenakan penelitian ini ditujukan sebagai penelitian awal untuk mengetahui proses pemesinan yang optimal pada pembuatan cetakan plastik. Sedangkan respon yang hendak diteliti adalah kekasaran permukaan dan waktu pemesinan yang selanjutnya akan digunakan untuk menghitung laju pemakanan material.

Proses pemesinan *milling* pada penelitian ini dilakukan pada sebuah fitur *pocket* dengan dimensi $P \times L \times T$ adalah 20 mm x 20 mm x 1 mm. Fitur

pocket dipilih karena fitur ini sederhana dan sesuai digunakan sebagai penelitian awal. Sedangkan mesin CNC *milling* yang digunakan adalah jenis *CNC Milling MAHO 800E*. Pahat yang digunakan adalah *endmill Hanita 4004 RT* berdiameter pahat = 10 mm dengan mata pahat sebanyak 4 buah. Untuk pahat tersebut, kecepatan pemakanan yang disarankan oleh *supplier* pahat adalah 446 mm/min dan putaran spindel yang disarankan adalah 2229 rpm [10].

Untuk menghasilkan variasi *cut type*, alat bantu *software CAM* yang digunakan pada penelitian ini adalah *Pro/E 2001 Educational Version type Manufacturing sub type NC Part* atau disebut juga *Pro/Manufacturing*. Selain itu, *software* ini juga digunakan untuk pembuatan *G-code* yang setelah digenerasi akan dikirimkan pada mesin CNC.

Untuk mengetahui respon berupa kekasaran permukaan, dilakukanlah pengukuran kekasaran permukaan rata-rata (*Ra*). Alat pengukur kekasaran yang digunakan adalah *Hahn & Kolb Stuttgart*. Setelah data kekasaran permukaan dan waktu pemesinan telah didapatkan, data penelitian tersebut diolah dengan menggunakan *software MINITAB 14* untuk mendapatkan dugaan model persamaan untuk kekasaran permukaan dan laju pemakanan material. Selanjutnya, model persamaan tersebut diverifikasi untuk menguji apakah model tersebut sudah merupakan model terbaik dan juga untuk menguji apakah residual yang terjadi memiliki sifat identik, independen, dan berdistribusi normal.

Jika model yang didapatkan adalah model dugaan yang terbaik dan residual yang terjadi memiliki sifat yang diinginkan maka langkah optimasi bisa dilakukan. Pada optimasi ini, fungsi tujuan yang hendak dicapai adalah memaksimalkan laju pemakanan material (*Material Removal Rate/MRR*) dan meminimalkan kekasaran permukaan (*Ra*). Untuk itu variabel desain yang dipakai adalah pergeseran pahat, kedalaman potong, dan *cut type*. Adapun *constraint* yang membatasi ada dua yaitu pergeseran pahat harus lebih besar sama dengan dari 1 mm tapi harus lebih kecil sama dengan 7 mm dan kedalaman pemotongan harus lebih besar sama dengan dari 0,18 mm tapi harus lebih kecil sama dengan 0,22 mm.

Langkah optimasi dilakukan dengan menggunakan *Response Surface Methodology* berbantuan *respon optimizer* dari *software MINITAB 14* untuk menemukan suatu harga *Ra* yang minimum dan *MRR* yang maksimum. Karena *cut type* merupakan parameter kualitatif, optimasi ini dilakukan pada masing-masing *cut type*.

Tabel 1. Level Faktor untuk Pergeseran Pahat dan Kedalaman Pemotongan

Parameter	-1,4142	-1	0	1	1,4142
Pergeseran pahat	1 mm	2 mm	4 mm	6 mm	7 mm
Kedalaman pemotongan	0,18 mm	0,19 mm	0,20 mm	0,21 mm	0,22 mm

Agar penelitian yang dilakukan terfokus, maka ditetapkan beberapa batasan masalah. Batasan yang pertama yaitu temperatur pemotongan dianggap konstan. Selain itu, getaran, defleksi pahat dan keausan pahat diasumsikan tidak mempengaruhi kekasaran permukaan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Percobaan *first order* yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan empat *run* percobaan ditambah dua *run* percobaan di titik pusat untuk masing-masing *cut type*, sehingga keseluruhan menggunakan dua belas *run* percobaan. Rancangan dan hasil pengukuran respon pada percobaan *first order* dapat dilihat pada Tabel 2. Setelah dilakukan *analysis of variant* ternyata didapatkan data bahwa persamaan model untuk *MRR* tersebut tidak linear. Oleh karena itu percobaan harus dilakukan dengan melakukan percobaan *second order*.

Demikian pula setelah dilakukan *analysis of*

variant terhadap data *Ra*, ternyata persamaan model untuk *Ra* juga tidak linear dan harus dilanjutkan dengan percobaan *second order*.

Percobaan *second order* dilakukan dengan menggunakan rancangan yang terlihat pada tabel 3 yaitu dua belas *run* percobaan seperti yang dilakukan pada percobaan *first order* ditambah empat *run* pada titik aksial. Hasil percobaan dari percobaan *second order* dapat dilihat pada Tabel 3.

Setelah data percobaan *second order* ini diolah dengan menggunakan *software* diperoleh persamaan model dugaan untuk laju pemakanan material (*MMR*) dan kekasaran permukaan (*Ra*).

Dugaan model terbaik *MRR* untuk *zig-zag cut type* adalah

$$MRR = 8,949 + 0,871 \left(\frac{\delta_1 - 4}{2} \right) + 0,768 \left(\frac{\delta_2 - 0,2}{0,01} \right) - 1,18 \left(\frac{\delta_1 - 4}{2} \right)^2 - 0,00027 \left(\frac{\delta_2 - 0,2}{0,01} \right)^2 \quad (1)$$

Tabel 2. Rancangan dan Data Percobaan *First Order*

No.	Run	Coded Variabel			Pergeseran Pahat (mm)	Kedalaman Potong (mm)	Cut Type	MRR (mm ³ /s)	Ra (μm)
1	5	-1	-1	-1	2	0,19	Zig-Zag	6,48	0,95
2	1	1	-1	-1	6	0,19	Zig-Zag	7,32	1,32
3	8	-1	1	-1	2	0,21	Zig-Zag	7,33	1,20
4	4	1	1	-1	6	0,21	Zig-Zag	8,58	1,62
5	6	0	0	-1	4	0,2	Zig-Zag	8,27	1,47
6	11	0	0	-1	4	0,2	Zig-Zag	8,41	1,45
7	9	-1	-1	1	2	0,19	Spiral	5,52	1,05
8	3	1	-1	1	6	0,19	Spiral	6,51	1,33
9	10	-1	1	1	2	0,21	Spiral	6,41	1,10
10	7	1	1	1	6	0,21	Spiral	8,52	1,37
11	2	0	0	1	4	0,2	Spiral	8,31	1,30
12	12	0	0	1	4	0,2	Spiral	8,20	1,39

Tabel 3. Rancangan dan Data Percobaan *Second Order*

No.	Run	Coded Variabel			Pergeseran Pahat (mm)	Kedalaman Potong (mm)	Cut Type	MRR (mm ³ /s)	Ra (μm)
1	5	-1	-1	-1	2	0,19	Zig-Zag	6,48	0,95
2	1	1	-1	-1	6	0,19	Zig-Zag	7,32	1,32
3	8	-1	1	-1	2	0,21	Zig-Zag	7,33	1,20
4	4	1	1	-1	6	0,21	Zig-Zag	8,58	1,62
5	6	0	0	-1	4	0,2	Zig-Zag	8,27	1,47
6	11	0	0	-1	4	0,2	Zig-Zag	8,41	1,45
7	9	-1	-1	1	2	0,19	Spiral	5,52	1,05
8	3	1	-1	1	6	0,19	Spiral	6,51	1,33
9	10	-1	1	1	2	0,21	Spiral	6,41	1,10
10	7	1	1	1	6	0,21	Spiral	8,52	1,37
11	2	0	0	1	4	0,2	Spiral	8,31	1,30
12	12	0	0	1	4	0,2	Spiral	8,20	1,39
13	13	-α	0	-1	1	0,2	Zig-Zag	5,30	1,59
14	15	α	0	-1	7	0,2	Zig-Zag	10,70	1,81
15	14	0	-α	-1	4	0,18	Zig-Zag	7,58	1,61
16	16	0	α	-1	4	0,22	Zig-Zag	8,98	1,85

Dugaan model terbaik MRR untuk *spiral cut type* adalah:

$$MRR = 8,311 + 0,871 \left(\frac{\delta_1 - 4}{2} \right) + 0,768 \left(\frac{\delta_2 - 0,2}{0,01} \right) - 1,18 \left(\frac{\delta_1 - 4}{2} \right)^2 - 0,270 \left(\frac{\delta_2 - 0,2}{0,01} \right)^2 \quad (2)$$

Dugaan model terbaik Ra untuk *zig-zag cut type* adalah:

$$Ra = 1,515 + 0,141 \left(\frac{\delta_1 - 4}{2} \right) + 0,0816 \left(\frac{\delta_2 - 0,2}{0,01} \right) - 0,100 \left(\frac{\delta_1 - 4}{2} \right)^2 - 0,0853 \left(\frac{\delta_2 - 0,2}{0,01} \right)^2 \quad (3)$$

Dugaan model terbaik Ra untuk *spiral cut type* adalah:

$$Ra = 1,385 + 0,141 \left(\frac{\delta_1 - 4}{2} \right) + 0,0816 \left(\frac{\delta_2 - 0,2}{0,01} \right) - 0,100 \left(\frac{\delta_1 - 4}{2} \right)^2 - 0,0853 \left(\frac{\delta_2 - 0,2}{0,01} \right)^2 \quad (4)$$

dengan

δ_1 : *natural variable* untuk pergeseran pahat

δ_2 : *natural variable* untuk kedalaman potong

Terlihat dari persamaan model MRR yang dihasilkan baik untuk *zig-zag* dan *spiral cut type* bahwa pergeseran pahat yang semakin besar akan meningkatkan MRR . Hal ini dikarenakan semakin besar pergeseran pahat maka semakin banyak pula jumlah material yang terpotong. Begitu juga dengan kedalaman potong, semakin dalam kedalaman potong akan meningkatkan MRR . Hal ini dikarenakan semakin besar kedalaman potong maka semakin banyak pula jumlah material yang terpotong.

Dari persamaan model Ra , pergeseran pahat yang semakin besar akan meningkatkan Ra . Hal ini dikarenakan pergeseran pahat yang semakin besar akan memperbesar juga *scallop height* yang terjadi sehingga kekasaran permukaan yang terjadi semakin tinggi. Begitu juga dengan kedalaman potong, semakin dalam kedalaman potong akan meningkatkan Ra . Hal ini dikarenakan semakin besar kedalaman potong maka semakin besar usaha pahat untuk memotong benda kerja sehingga kekasaran permukaan yang terjadi semakin tinggi. Sedangkan dari persamaan model MRR dan Ra diketahui bahwa *zig-zag cut type* akan menghasilkan MRR dan juga Ra yang lebih besar dibandingkan dengan *spiral cut type*.

Setelah dilakukan pengujian terhadap residual didapatkan bahwa residual memenuhi asumsi independen, identik dan terdistribusi normal. Oleh karena itu, persamaan model baik untuk laju pemakanan material dan kekasaran permukaan dapat digunakan untuk melakukan optimasi. Dari data yang dihasilkan *response optimizer* dari *software*

MINITAB 14, diperoleh titik stasioner pada pergeseran pahat adalah 6,7582 mm dan kedalaman potong adalah 0,22 mm. Dengan mengimplementasikan pergeseran pahat dan kedalaman potong yang optimal, MRR yang dihasilkan untuk *zig-zag cut type* adalah 9,619 mm³/detik dengan Ra sebesar 1,5124 μ m. Sedangkan MRR untuk *spiral cut type* yang maksimum adalah 8,981 mm³/detik dengan Ra sebesar 1,3824 μ m.

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa baik untuk *zig-zag* ataupun *spiral cut type*, pergeseran pahat dan kedalaman potong yang semakin besar akan meningkatkan MRR dan Ra . Sedangkan *zig-zag cut type* akan menghasilkan MRR dan juga Ra yang lebih besar dibandingkan dengan *spiral cut type*.

Dari hasil optimasi, pergeseran pahat dan kedalaman potong yang paling optimum secara berurutan adalah 6,7582 mm dan 0,22 mm. MRR maksimum yang dihasilkan untuk *zig-zag cut type* adalah 9,619 mm³/detik dengan Ra minimum sebesar 1,5124 μ m. Sedangkan MRR maksimum untuk *spiral cut type* adalah 8,981 mm³/detik dengan Ra minimum sebesar 1,3824 μ m.

DAFTAR PUSTAKA

1. Ramos A.M., Relvas C., Simoes J.A., "The influence of finishing milling strategies on texture, roughness, and dimensional deviations on the machining of complex surfaces", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 136, No.1-3, 2003, pp. 209-216.
2. Wang M.Y., Chang H.Y., "Experimental study of surface roughness in slot end milling AL2014-T6", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44, No. 1, 2004, pp. 51-57.
3. Benardos P.G., Vosniakos G.C., "Prediction of surface roughness in CNC face milling using neural networks and Taguchi's design of experiments", *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 18, No.5-6, 2002, pp. 343-354.
4. Chang C.K., Lu H.S., "Study on the prediction model of surface roughness for side milling operations", *International Journal of Advance Manufaacturing Technology*, Vol. 29, No. 9-10, 2006, pp. 867-878.
5. Ryu S.H., Choi D.K., Chu C.N., "Roughness and texture generation on end milled surfaces", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, No. 3-4, 2006, pp. 404-412.

6. Göloğlu C., Arslan Y., *Zigzag Machining Surface Roughness Modelling Using Evolutionary Approach*, IMS'2006: 5th International Symposium on Intelligent Manufacturing Systems, Agents and Virtual Worlds, 2006, pp. 734-742
7. Oktem H., Erzurumlu T., Kurtaran H., "Application of response surface methodology in the optimization of cutting conditions for surface roughness", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 170, No. 1-2, 2005, pp. 11-16.
8. Reddy N.S.K., Rao P.V., "Selection of optimum tool geometry and cutting conditions using a surface roughness prediction model for end milling", *International Journal of Advance Manufacturing Technology*, Vol. 26, No.11-12, 2005, pp. 1202-1210.
9. Zhang J.Z., Chen J.C., Kirby E.D., "Surface roughness optimization in an end-milling operation using the Taguchi design method", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 184, No. 1-3, 2007, pp. 233-239.
10. Choudhury S.K., Appa Rao, I.V.K., "Optimization of cutting parameters for maximizing tool life", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 39, No. 2, 1999, pp. 343-353
11. HANITA *Cutting Tool Catalog*, <http://www.hanita.com/us/catalog.htm>